

А. А. АНДИЛАХАЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Разработана математическая модель и проведен теоретический анализ параметров струйно-абразивной обработки деталей

В последнее время заметно возросло практическое применение различных методов гидроабразивной отделочной обработки деталей, особенно гидроабразивной струей [1, 5–8]. Метод обладает рядом несомненных достоинств, к числу которых можно отнести: универсальность обрабатываемого инструмента, оснастки и оборудования, экономичность, простота конструкции и обслуживания. Из большого числа публикаций по этому направлению следует выделить работы Проволоцкого А. Е. [1, 2]. Вместе с тем, существенным недостатком такой обработки является интенсивный износ каналов сопел, через которые подается абразивная суспензия.

Целью настоящей работы является научное обоснование выбора технологических параметров обработки по методу Бокса-Уилсона [3] на основе экспериментальных исследований процесса струйно-абразивной обработки мелких деталей малой жесткости затопленными струями сжатого воздуха, когда абразивный материал (в виде порошка) не прокачивается через каналы сопел струйного аппарата, а присоединяются к струе за их пределами.

Исследование влияния основных технологических параметров на производительность процесса выполнено по плану дробного факторного эксперимента с построением математической модели. Построение математической модели состоит из нижеследующих этапов: выбор критерия оптимизации; выбор и кодирование факторов; составление плана-матрицы эксперимента; рандомизация опытов; реализация плана эксперимента; проверка воспроизводимости опытов; проверка адекватности линейной модели; оценка значимости коэффициентов регрессии.

Основным назначением исследуемого процесса является удаление заусенцев и достижение заданной шероховатости поверхностей, поэтому критерий оптимизации должен оценивать изменение состояния кромок деталей, а также шероховатость поверхности. Поскольку удаление заусенцев является процессом многократной пластической деформации и постепенного удаления микрообъемов поверхностного слоя со всех участков, в том числе и кромок деталей, косвенными критериями оптимизации могут служить: число следов абразивных частиц на единичных площадях поверхности образцов, величина металлоудаления с контрольных образцов в единицу времени, а также высота микронеровностей обработанной поверхности. В целях выявления предельных значений параметров, при которых существует процесс струйно-

абразивной обработки, выявления степени чувствительности выбранных критериев оптимизации, а также отбора наиболее важных факторов необходимы предварительные эксперименты. В процессе предварительных экспериментов установлено, что следы абразивных частиц распределяются по поверхностям полированных контрольных образцов неравномерно: вдоль кромок более плотно, у центров граней – менее плотно. Кроме того, следы отличаются размерами и формой, что затрудняет получение объективной оценки производительности процесса, который может интенсифицироваться не только за счет увеличения количества ударов абразивных частиц, но и за счет силы единичных ударов. Однако в пределах поверхности одного образца подсчет количества равноценных следов на контрольных площадках, ограниченных полем видимости микроскопа, не представляет особой трудности.

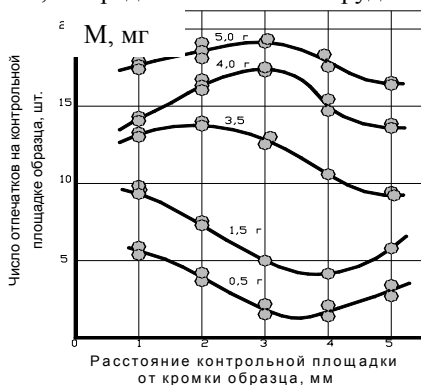


Рис. 1. Зависимость критерия производительности обработки от единичной массы обрабатываемых деталей: Δ – число отпечатков на торцах образцов; \circ – на плоскостях тех же образцов.

Исследование поверхности образцов позволило выявить закономерности изменения интенсивности воздействия частиц по мере приближения к кромкам обрабатываемой детали. На рис. 1 показана связь между плотностью распределения следов абразивных частиц и расстоянием от кромок деталей различной формы и массы. Из графиков видно, что максимальное количество следов частиц для деталей массой от 0,5 до 3,5 г приходится на кромки, а для деталей большей массы максимум несколько смещен к средней части. Это объясняется тем, что детали с меньшей массой способны противостоять потоку сжатого воздуха, жидкости и абразивного материала только в том случае, когда они ориентированы кромками к соплам, т.е. положением, соответствующим наименьшему лобовому сопротивлению. Детали с большей массой удерживаются в струйном потоке большее время и ориентируются почти равнозначно сторонами, соответствующими меньшему и большему лобовому сопротивлению. Таким образом, установлено, что для листовых штампованных деталей массой от 0,5 до 3,5 г металlosъем локализуется вдоль кромок, где и расположены заусенцы. В связи с этим, удобным критерием с точки зрения простоты

контроля, непрерывности роста и чувствительности к воздействию на кромки является величина металlosъема с контрольных образцов в единицу времени. Поскольку аналитическое выражение функции неизвестно, представим ее в виде линейного полинома, построение которого возможно в любой точке факторного гиперпространства:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где y - металlosъем в единицу времени с контрольных образцов, мг; b_0 , b_i , b_j - выборочные коэффициенты регрессии, устанавливаются экспериментально.

Факторы, уровни и интервалы варьирования факторов, выбранных по результатам постановочных опытов, приведены в табл. 1. Рандомизация опытов назначена по таблице случайных чисел [3] и приведена в табл. 2.

В числе выбранных шести параметров имеются два, взаимодействие которых по априорным данным [4] предполагается существенным, поэтому при минимизации количества опытов в выбранном плане типа 2^{6-3} , представляющем собой 1/8 реплики, эффект взаимодействия между x_1 и x_2 факторами оценивается отдельно. В связи с этим выбраны следующие генерирующие соотношения:

$$x_4 = x_1 x_3; \quad x_5 = x_2 x_3; \quad x_6 = x_1 x_2 x_3.$$

Тогда получаем следующие определяющие контрасты:

$$I = x_1 x_3 x_4; \quad I = x_2 x_3 x_5; \quad I = x_1 x_2 x_3 x_6.$$

Перемножив попарно определяющие контрасты, получим:

$$I = x_1 x_2 x_4 x_5; \quad I = x_1 x_5 x_6; \quad I = x_2 x_4 x_6.$$

Произведение трех определяющих контрастов равно $I = x_3 x_4 x_5 x_6$. Разрешающая способность данной 1/8 реплики выражается обобщающим определяющим контрастом

$$I = x_1 x_3 x_4 = x_2 x_3 x_5 = x_1 x_2 x_3 x_6 = x_1 x_2 x_4 x_5 = x_1 x_5 x_6 = x_2 x_4 x_6.$$

Оценки смешиваются следующим образом:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{34} + \beta_{56} + \beta_{236} + \beta_{245};$$

$$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{35} + \beta_{46} + \beta_{136} + \beta_{145};$$

$$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{14} + \beta_{25} + \beta_{136} + \beta_{456};$$

$$b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{13} + \beta_{26} + \beta_{125} + \beta_{356};$$

$$b_5 \rightarrow \beta_5 + \beta_{23} + \beta_{16} + \beta_{124} + \beta_{346};$$

$$b_6 \rightarrow \beta_6 + \beta_{15} + \beta_{24} + \beta_{123} + \beta_{345};$$

Если пренебречь тройными взаимодействиями как незначимыми, то каждая оценка будет смешана с двумя парными взаимодействиями, но поскольку постулируется линейная модель, за исключением известного существенного взаимодействия $x_1 x_2$, парные оценки β_{56} , β_{34} , β_{35} , β_{46} , β_{14} , β_{25} , β_{13} , β_{26} , β_{23} , β_{16} , β_{15} , β_{24} незначимы и, следовательно, $b_1 = \beta_1$; $b_2 = \beta_2$; $b_3 = \beta_3$; $b_4 = \beta_4$; $b_5 = \beta_5$; $b_6 = \beta_6$ все основные эффекты оцениваются раздельно друг от друга.

Для построения матрицы планирования 2^{6-3} используем матрицу 2^3 , достраивая ее с помощью генерирующих соотношений соответствующими уровнями.

Таблица 1 – Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	+1	0	-1	
x_1 - объем загружаемого абразива, $V_a, \text{см}^3$	140	100	60	40
x_2 - единичная масса деталей, $m_0, \text{г}$	3	1,75	0,5	1,25
x_3 - суммарная масса обрабатываемых деталей, $Q, \text{кг}$	0,325	0,21	0,1	0,11
x_4 - объем заливаемой жидкости $W_{\text{жс}}, \text{л}$	1,5	1,0	0,5	0,5
x_5 - зернистость абразивного материала, $d_a, \text{мкм}$	630	415	200	215
x_6 - содержание соды (Na_2CO_3) в жидкости, $K_{\text{жс}}, \%$	3	1,5	0	1,5

Матрица планирования, представляющая собой 1/8 реплики от 2^6 , заданная генерирующими соотношениями: $x_4 = x_1 x_3$; $x_5 = x_2 x_3$; $x_6 = x_1 x_2 x_3$ и результаты эксперимента показаны в табл. 2. Воспроизводимость процесса проверена с помощью критерия Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum S_u^2} \leq G(0,05; f_n; f_u), \quad (2)$$

где $S_u^2 = \sum_{p=1}^m (Y_{up} - \bar{Y})^2$ - дисперсия результатов опытов на u -том сочетании уровней факторов (значения сведены в табл. 2); $p = 1, 2, \dots$; $m = 2$ число параллельных опытов; $S_{u \max}^2 = 0,07$ - наибольшая из дисперсий; $G(0,05; f_n; f_u) = 0,6798$ - табличное значение критерия Кохрена при 5% уровне значимости; $f_n = n = 8$ - число независимых оценок дисперсии; $f_u = m - 1 = 1$ - число степеней свободы каждой оценки; $G = 0,21$. Процесс воспроизводим, так как $G = 0,21 < G(0,05; 8; 1) = 0,6798$. При этом дисперсия воспроизводимости

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_y^2}{n} = \frac{0,32}{8} = 0,04. \quad (3)$$

Расчет коэффициентов регрессии произведен по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u x_{iu}}{n}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u x_{iu} x_{ju}}{n};$$

В соответствии с этим получен полином:

$$y = 17,3 + 2,625x_1 - 2,575x_2 - 1,2x_3 - 1,775x_4 + 0,375x_5 + 0,96x_6 + 1,95x_1x_2. \quad (4)$$

Адекватность полученной модели проверялась с помощью критерия Фишера. Гипотеза об адекватности модели принимается, если выполняется равенство

$$F = \frac{S_{a\theta}^2}{S_y^2} \leq F(0,05; f_{a\theta}; f_y), \quad [3] \quad (5)$$

где $S_{a\theta}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n-k-1}$; y_u - расчетное значение отклика в u -том опыте;

$F(0,05; f_{a\theta}; f_y)$ - критерий Фишера при 5% уровне значимости; $f_{a\theta} = n-k-1$ - число степеней свободы дисперсии адекватности; f_y - число степеней свободы дисперсии воспроизводимости.

Таблица 2 – Матрица планирования дробного факторного эксперимента 2^{6-3} (1/8 реплики)

Рандомизация опытов	Фиктивная переменная x_0	Объем абразива x_1	Единичная масса детали x_2	Суммарная масса деталей x_3	Эффект взаимодействия $x_1 x_2$	Объем жидкости $x_1 x_3 = x_4$	Зернистость абразива $x_2 x_1 = x_5$	Содержание соды $x_1 x_2 x_3 = x_6$	Металлосъем			S_u^2	y_u значение отклика
									y_{u1}	y_{u2}	\bar{y}_u		
2	+	-	-	+	+	-	-	+	20,16	20,44	20,3	0,04	20,3
5	+	+	-	-	-	-	+	+	24,64	24,95	24,8	0,05	24,8
8	+	-	+	-	-	+	-	+	10	10,2	10,1	0,02	10,1
1	+	+	+	+	+	+	+	+	17,45	17,75	17,6	0,05	17,6
3	+	-	-	-	+	+	+	-	17,92	18,28	18,1	0,07	18,1
7	+	+	-	+	-	+	-	-	16,16	16,44	16,3	0,04	16,3
4	+	-	+	+	-	-	+	-	10,32	10,08	10,2	0,03	10,2
6	+	+	+	-	+	-	-	-	21,1	20,9	21	0,02	21

По полученному уравнению найдены расчетные значения y_u (данные занесены в табл. 2). Поскольку получено абсолютное совпадение y_u и y , дисперсия адекватности будет равна 0, в соответствии с этим любое значение критерия Фишера будет удовлетворять условию адекватности. Отсюда следует, что полученная модель адекватно описывает исследуемый процесс. Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо. Оцен-

ка выполнена с помощью t - критерия Стьюдента. Коэффициент считается значимым, если выполняется неравенство

$$|b_i|^3 \Delta b_i = t(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где $t(0,05; f_y)$ - 5%-ная точка распределения Стьюдента с $f_y = 1$ степенями свободы,

$$\Delta b_i = 12,71 \frac{\sqrt{0,04}}{\sqrt{8}} 0,898.$$

Все полученные по расчету коэффициенты регрессии, кроме $b_5 = 0,375$, значимы. Это значит, что погрешностью y в уравнении регрессии будет величина 0,375. Поскольку коэффициент b_5 имеет положительный знак, параметр оптимизации должен расти при его увеличении, однако дальнейшее увеличение зернистости абразива приводит к снижению класса шероховатости R_z более 6,3 – 6,8 мкм, в связи с этим увеличение интервала варьирования нецелесообразно. На основании проведенной серии экспериментов полученное уравнение регрессии (4) с учетом значимости коэффициентов примет вид:

$$y = 17,3 + 2,625x_1 - 2,575x_2 - 1,2x_3 - 1,775x_4 + 0,96x_6 + 1,95x_1x_2. \quad (7)$$

Для использования в технологических расчетах полученное уравнение приведено к натуральным переменным с учетом соотношений:

$$x_1 = \frac{V-100}{40}; \quad x_2 = \frac{m-1,75}{1,25}; \quad x_3 = \frac{Q-0,2125}{0,1125}; \quad x_4 = \frac{W-1}{0,5}; \quad x_6 = \frac{K-1,5}{1,5}.$$

После простого преобразования получим:

$$M = 26,086 - 0,003V_a - 5,96m_o - 10,65Q_o - 3,55W_{\text{жс}} + 0,6k + 0,039m_oV_a. \quad (8)$$

Зависимость шероховатости поверхности от важнейших параметров струйно-абразивной обработки описывается математической моделью, построенной аналогичным путем; уравнение регрессии имеет вид:

$$y_R = 1,18 + 0,028x_1 - 0,083x_2 - 0,15x_3 + 0,066x_4 + 0,023x_1x_2.$$

В переводе к натуральным переменным:

$$R_a = 1,5 - 0,03V_a - 0,11m_o - 0,33Q_o + 0,033W_{\text{жс}} + 0,096 m_oV_a.$$

Полученное уравнение позволяет прогнозировать результаты обработки, решать компромиссные задачи выбора максимальной производительности при заданной шероховатости. В установленном диапазоне значений параметров процесса шероховатость поверхности изменяется в узких пределах от $R_a = 0,96$ до $R_a = 1,54$.

Зависимость шероховатости поверхности от основных технологических параметров процесса проиллюстрирована графиком (рис. 2). Из приведенных графиков видно, что высота микронеровностей снижается при уменьшении количества абразивного материала и при увеличении единичной и суммарной массы загруженных деталей. Из графиков также видно, что высота микронеровностей на деталях растет при одновременном увеличении единичной и суммарной массы деталей.

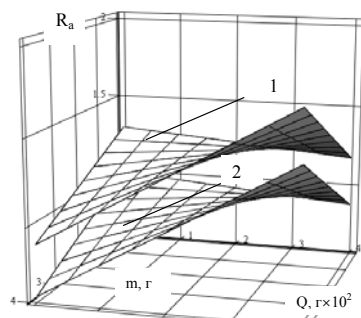


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от единичной m и суммарной Q массы деталей и суммарной массы абразива: 1 – 140 см³; 2 – 60 см³ в рабочей камере.

Зависимость съема металла от основных параметров продемонстрирована графиком на рис. 3. Здесь съем металла возрастает при уменьшении единичной и суммарной массы обрабатываемых деталей, а также при увеличении объема абразивного материала. Полученные функциональные зависимости имеют следующий физический смысл. Детали с минимальной единичной массой легко разгоняются струей сжатого воздуха и ударяются об обрезающие стенки рабочей камеры. В момент столкновения, между стенкой и деталью могут находиться абразивные зерна, которые производят деформацию микрообъемов металла детали. Вероятность нахождения абразивных зерен в месте столкновения детали с абразивной стенкой увеличивается в том случае, когда объем абразивного материала, загружаемого в рабочую камеру, - максимальный. Это является причиной повышения производительности и увеличения высоты микронеровностей.

При увеличении суммарной массы загрузки деталей энергия струй сжатого воздуха, приходящаяся на одну деталь, уменьшается. В связи этим скорость их движения падает, удары о стенки становятся слабыми, а съем металла достигается только за счет разности скоростей абразивных зерен и деталей. При этом высота микронеровностей уменьшается и становится характерной для воздействия единичными абразивными зернами в воздушной струе.

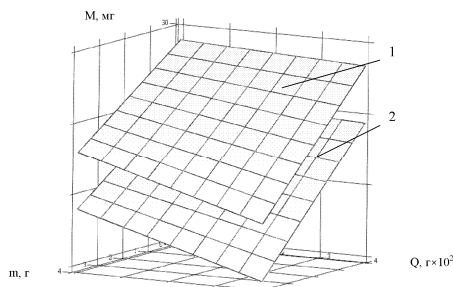


Рис. 3. Зависимость металлосъема M от единичной массы деталей m , суммарной массы Q и суммарной массы абразива: 1 – 140 см³; 2 – 60 см³ в рабочей камере.

Снижение производительности, выраженное уменьшением съема металла с контрольных образцов при увеличении количества рабочей жидкости, так же как при увеличении суммарной массы обрабатываемых деталей, объясняется уменьшением удельных затрат энергии струй сжатого воздуха в массе загрузки. Слабое влияние зернистости абразивного материала на съем металла и шероховатость поверхности объясняется тем, что абразивные зерна меньшей зернистости, инжектируясь в струи, быстрее набирают скорость, чем более крупные зерна. Поэтому запас кинетической энергии крупных зерен, имеющих большую массу, но малую среднюю скорость перед столкновением с деталью, равен запасу кинетической энергии мелких зерен, имеющих малую массу, но большую скорость.

Список литературы: 1. Проволоцкий А.Е. Механизация отделки деталей с использованием струйно-абразивной обработки // Механизация и автоматизация пр-ва. – 1990. – № 5. – С. 7-10. 2. Проволоцкий А.Е., Гришин В.С. Акустический контроль технологических параметров струйно-абразивной обработки // Прогресс. технол. процессы в машиностр. и стимул. их внедрения в пр-во, 18-20 сент., 1990: Тез. докл. обл. науч.-практ. конф. – Харьков, 1990. – С. 126. 3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с. 4. Сергиев А.П., Андилахай А.А. Струйно-абразивная обработка мелких деталей во вращающемся потоке. – Станки и инструмент. – 1981. – №11. – С. 18-20. 5. Патент 4922664 США. МКИ⁵ В 24 С 5/04. Гидропескоструйная установка. 6. Патент 4936059 США. МКИ⁵ В 24 С 5/04. Способ и устройство для гидроабразивной струйной обработки. 7. Заявка 3702675 ФРГ. МКИ⁴ В 08 В 3/02. Устройство для гидроструйной очистки. 8. Заявка 3817641 ФРГ. МКИ⁴ В 08 В 3/02. Устройство для гидроструйной очистки поверхности.

Поступила в редколлегию 11.12.08

УДК 621.922.04

И.Е. ИВАНОВ

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБОВЫХ ОТВЕРСТИЙ В ГОРЛОВИНАХ БАЛЛОНОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров точности обработки отверстий в горловинах баллонов и качества нарезания в них герметичной конической резьбы и предложены новые решения по созданию эффективного технологического процесса механической обработки резьбовых отверстий в горловинах баллонов

При изготовлении баллонов в условиях массового производства на автоматических линиях возникают сложные задачи по обеспечению качественного нарезания герметичной конической резьбы в отверстиях горловины баллона под вентиль. Практикой установлено, что до 16% изготавливаемых баллонов из стали 30ХМА не соответствуют требованиям по качеству нарезания резьбы вследствие образования тугой или прослабленной резьбы [1–3]. Это